"نشریه علوم زراعی ایران"
جلد بیست و پنجم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۲

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.23223243.2021.19.1.29.0

گزینش ژنوتیپ‌های گندم دوروم (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) متحمل به تنش خشکی انتهای فصل با استفاده از شاخص‌های چند صفتی (MGIDI)

Selection of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) genotypes tolerant to terminal season drought stress using multi-trait indices (MGIDI)

منوچهر دست‌فال[۱]، توحید نجفی میرک[۲] و حسن زالی[۳]

چکیده

دست‌فال، م.، ت. نجفی میرک و ح. زالی. ۱۴۰۲. گزینش ژنوتیپ‌های گندم دوروم (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) متحمل به تنش خشکی انتهای فصل با استفاده از شاخص‌های چند صفتی (MGIDI). **نشریه علوم زراعی ایران. ۲۵ (۳): ۳۶۱ -۳۴۲.**

وقوع تنش خشکی در انتهای فصل یکی از عوامل مهم کاهش عملکرد در گندم دوروم می‌باشد. به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی، تعداد ۱۷ لاین امیدبخش گندم دوروم در ایستگاه تحقیقات کشاورزی داراب در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۰۱-۱۴۰۰) در شرایط بدون تنش و تنش خشکی (قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که شاخص انتخاب ژنوتیپ مطلوب (SIIG) و شاخص ترکیب شاخص‌های معنی‌دار (CSI) همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش (Yp) و عملکرد دانه در شرایط تنش (Ys) داشتند. شاخص فاصله ژنوتیپ- ایدئوتیپ چند صفتی (MGIDI) همبستگی منفی و معنی‌داری با Yp و Ys داشت. براساس نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی، ژنوتیپ‌های گندم دوروم در چهار ناحیه نمودار بای پلات قرار گرفتند. ژنوتیپ‌های ناحیه یک (لاین‌های ۵، ۷، ۹، ۱۲ و ۱۵) دارای عملکرد دانه پایین در هر دو شرایط تنش و بدون تنش بودند. ژنوتیپ‌های ناحیه دو (ارقام و لاین‌های ۱، ۲، ۱۴ و ۱۹) دارای عملکرد دانه بالا در شرایط بدون تنش بودند. ژنوتیپ‌های ناحیه سه (لاین‌های ۶، ۱۰، ۱۳، ۱۷ و ۱۸) دارای عملکرد دانه بالا در هر دو شرایط تنش و بدون تنش بودند و انتخاب ژنوتیپ‌های برتر از این ناحیه انجام شد. شاخص‌های میانگین بهره‌وری (MP)، میانگین هندسی بهره‌وری (GMP)، میانگین هارمونیک عملکرد (HM) و شاخص تحمل به تنش (STI) که در ناحیه سه نمودار PCA قرار داشتند، از نظر شناسایی ژنوتیپ‌های پرمحصول و متحمل به تنش خشکی، نسبت به سایر شاخص‌ها برتری داشتند. ژنوتیپ‌های ناحیه چهار (ارقام و لاین‌های ۳، ۴، ۸، ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۲۰) دارای رتبه عملکرد دانه بهتری در شرایط تنش بودند. براساس نتایج این تحقیق، شاخص‌های MGIDI، CSI و SIIG کارایی لازم جهت انتخاب ژنوتیپ‌های پرمحصول و متحمل به تنش را به‌طور همزمان داشتند. نتایج شاخص های SIIG، MGIDI و CSI مشابه بود و ژنوتیپ‌های ۲، ۱۰، ۱۷ و ۱۸ انتخاب شدند، ولی براساس هر سه شاخص تنها لاین ۱۸ در رتبه اول قرار گرفت. بنابراین، لاین ۱۸ که در ناحیه سه نمودار PCA قرار گرفته و دارای عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل، هم در شرایط تنش و هم در شرایط بدون تنش بود، به‌عنوان ژنوتیپ متحمل به تنش خشکی برای توسعه کشت در منطقه داراب و سایر مناطق با شرایط مشابه، شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: تجزیه به مولفه‌های اصلی، شاخص‌های تحمل به خشکی، شاخص SIIG، عملکرد دانه و گندم دوروم

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹ این مقاله مستخرج از پروژه تحقیقاتی ۹۹۱۱۰۹-۱۳۰-۰۳-۰۳-۰ مصوب موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر می‌باشد
۱- مربی پژوهش، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، داراب، ایران
۲- استاد پژوهش، بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۳- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، داراب، ایران
(مکاتبه کننده) (پست الکترونیک: hzali90@yahoo.com)

Selection of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) genotypes tolerant to terminal season drought stress using multi-trait indices (MGIDI)

Dastfall M.[1], Najafi Mirak, T.[2] and Zali, H.[3]

ABSTRACT

Dastfall M., Najafi Mirak, T. and Zali, H. 2024. Selection of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) genotypes tolerant to terminal season drought stress using multi-trait indices (MGIDI). **Iranian Journal of Crop Sciences. 25(3): 342-361. (In Persian).**

Introduction: Drought stress constaints crop production in the world. Terminal season drought stress is one of the important environmental factors of yield reduction in durum wheat in semi-arid regions. Therefore, high yielding genotypes with drought tolerance is an efficient approach to mitigate its adverse effects. With declining resources of water and escalating intensity of drought, yield loss is an alarm in semi-arid regions. However, development of drought tolerance depends on complex traits and their interaction with environmental factors. Likewise, choosing genotypes with drought tolerant is a tricky task. Alternatively, some statistical parameters as well as drought tolerance indices can be employed to compare the changes in grain yield in normal and drought stress conditions for identification of high yielding genotypes with drought tolerance.

Material and Methods: To identify terminal season drought-tolerant genotypes, 17 promising genotypes of durum wheat were evaluated at the Darab Agricultural Research Station, Iran. The evaluation was conducted in randomized complete block design with three replications and over two cropping seasons (2020-2022), both under non-stress conditions and terminal drought stress conditions by irrigation withdrawal at the flowering stage (GS 60). The indices of drought tolerance studied were yield under non-stress conditions (Yp); yield under stress conditions (Ys); tolerance index (TOL); stress susceptibility index (SSI); mean productivity (MP); geometric mean productivity (GMP); stress tolerance index (STI); harmonic mean (HM); percentage of yield decrease (R%); yield index (YI); yield stability index (YSI); relative drought index (RDI); abiotic-stress tolerance index (ATI); stress susceptibility percentage index (SSPI); stress non-stress production index (SNPI). SIIG (selection index of ideal genotype), CSI (combination of significant indices) and MGIDI (multi-trait genotype-ideotype distance index) indices were used in order to integrate different indices of drought tolerance and better selection of drought tolerant genotypes.

Results: The results of combined analysis of variance for grain yield under non-stress and terminal season drought stress conditions indicated that the effects of year, environment and genotype on grain yield were significant. Additionally, the heatmap analysis revealed that the lowest observed grain yield was associated with terminal season drought stress conditions in the 2020-2021, while the highest observed grain yield occurred in the 2021-2022 under non-stress conditions. Furthermore, the highest grain yield (kg.ha^{-1}) under normal irrigation conditions (Yp) was observed for genotypes 2 (8178), 1 (7938), 17 (7698), 19 (7662), 18 (7659), 14 (7451), and 10 (7413), respectively. On the other hand, the highest grain yield (kg.ha^{-1}) under drought stress (Ys) was related to genotypes 18 (5639), 4 (5489), 8 (5479), 10 (5473), 13 (5434), and 6 (5404), respectively. Moreover, based on the TOL, ATI, and SSPI indices, genotypes 9, 4, 12, and 15 with the lowest values of these indices were identified as stress-tolerant genotypes. In addition, based on the SSI and %R indices, genotypes 4 and 8, which had the lowest values of these indices, respectively, were also classified as stress-tolerant genotypes. Examining the MP, GMP, and HM indices revealed that genotypes 2, 18, 1, 17, and 10 exhibited the highest values and were identified as the best-performing genotypes, respectively. Similarly, based on the SNPI index, genotypes 4, 8, 18, 13, and 6 demonstrated the highest values and were among the drought tolerant genotypes. The results also showed that the genotypes 18, 4, 8, 10, and 13 had the highest values of the YI index, respectively. The results revealed that the SIIG and CSI indices had positive and significant correlation with Yp and Ys. Conversely, MGIDI index had negative and significant correlation with Yp and Ys. The results of principal component analysis (PCA) revealed that the investigated genotypes were placed in four areas of the biplot diagram. The genotypes of area one (5, 7, 9, 12 and 15) exhibited low yield potential under both non-stress and stress conditions. The genotypes of the second region (1, 2, 14 and 19) showed high grain yield potential under non stress conditions. The genotypes of the third region (6, 10, 13, 17 and 18) demonstrated high yield potential under both non-stress and stress conditions, leading to their selection as superior genotypes. Therefore, MP, GMP, HM and STI indices were positioned within the area of the three PCA diagrams, proved suitable in identifying high yielding and drought tolerant genotypes. Furthermore, genotypes in fourth area (3, 4, 8, 11, 13, 15 and 20) displayed higher grain yield under terminal season drought stress conditions.

Conclusion: The results of this experiment showed that MGIDI, CSI and SIIG indices had sufficient efficiency in selecting high yielding and tolerant durum wheat genotypes. Efficiency of SIIG, MGIDI and CSI indices in selection of high yielding terminal drought tolerant genotypes were similar, and genotypes 2, 10, 17 and 18 were selected. However, based on all three indices, only genotype 18 ranked first. Therefore, genotype 18 which was located in the third area of PCA diagram and performed higher than average grain yield under both and non stress and stress conditions, was identified as adapted drought tolerant genotype for the Darab region and similar areas.

Key words: Grain yield, Drought tolerance indices, Durum wheat, Principal components analysis and SIIG index

Received: December, 2023 **Accepted: March, 2024**

1. Researcher, Field and Horticultural Crops Sciences Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Darab, Iran

2. Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran

3. Assistant Prof., Field and Horticultural Crops Sciences Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Darab, Iran (Corresponding author) (Email: Hzali90@yahoo.com)

مقدمه

گندم دوروم (*Triticum turgidum* L. var. durum) با سطح زیر کشت حدود ۱۷/۷میلیون هکتار و میزان تولید ۳۷ تا ۴۰ میلیون تن یکی از گیاهان مهم غلاتی دنیا محسوب می‌شود (International Grains Council, 2021). گندم دوروم که در مناطق خشک سوریه اهلی شده است، با محیط‌های تحت تنش سازگاری داشته و نسبت به خشک‌سالی و گرما تحمل بالایی دارد (Martínez-Moreno *et al.*, 2020). امروزه سهم محصولات گندم دوروم در رژیم‌های غذایی سالم، متعادل و مغذی رو به افزایش بوده و بنابراین روند جهانی تقاضا برای گندم دوروم نیز افزایشی است (Ermişer *et al.*, 2021). با توجه به اهمیت بالای گندم دوروم در صنعت و تغذیه (Gonzalez-Segura *et al.*, 2014)، تولید و اصلاح ارقام جدید متحمل به تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی، ضروری است. بنابراین یکی از اهداف مهم برنامه‌های به‌نژادی، تولید و معرفی ارقام متحمل به تنش خشکی است که دارای ویژگی‌های مناسبی برای کشت در مناطق مختلف کشور باشند.

تنش خشکی باعث کاهش میزان تولید و کیفیت گندم می‌شود. در بسیاری از تحقیقات کاهش عملکرد دانه گندم در شرایط تنش خشکی گزارش شده (Zivcak *et al.*, 2013) و شاخص‌های متعددی برای ارزیابی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی معرفی شده‌اند. شاخص تحمل (TOL) و شاخص میانگین بهره‌وری (MP) توسط روزیله و هامبلین (Rosielle and Hamblin, 1981)، شاخص تحمل تنش (STI) توسط فرناندز (Fernandez, 1992)، شاخص حساسیت به تنش (SSI) و شاخص خشکی نسبی (RDI) توسط فیشر و مائورر (Fischer and Maurer, 1978) و شاخص‌های تحمل غیرزیستی (Abiotic-stress tolerance index; ATI)، درصد حساسیت به تنش (Stress susceptibility percentage index; SSPI) و شاخص تولید در شرایط تنش و بدون تنش (Stress non-stress production index; SNPI) توسط موسوی و همکاران (Moosavi *et al.*, 2008) معرفی شده‌اند. استفاده از شاخص‌های SNPI، ATI و SSPI جهت ارزیابی تحمل به خشکی ژنوتیپ‌های انواع گیاهان زراعی در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است (Farshadfar and Elyasi, 2012؛ Mohammadnia *et al.*, 2017؛ Zali *et al.*, 2017).

برای انتخاب ارقام متحمل به تنش، استفاده از یک شاخص به تنهایی ممکن است نتایج مطلوبی نداشته باشد، ولی با ارزیابی ژنوتیپ‌ها با استفاده از شاخص‌های مختلف، احتمال شناسایی ژنوتیپ‌های مطلوب افزایش می‌یابد، بنابراین از شاخص انتخاب ژنوتیپ مطلوب (Selection index of ideal genotype; SIIG) و شاخص فاصله ژنوتیپ- ایدئوتیپ چند صفتی (Multi-trait genotype-ideotype distance index; MGIDI)، به‌منظور ادغام شاخص‌های تحمل به خشکی برای ارزیابی بهتر ژنوتیپ‌ها استفاده شده است. SIIG یک شاخص چندمعیاره است که برای انتخاب ژنوتیپ‌های برتر از نظر شاخص‌ها (صفات) مختلف مناسب می‌باشد (Zali *et al.*, 2015; Zali *et al.*, 2023). اولیوتو و ناردینو (Olivoto and Nardino, 2020) شاخص MGIDI را معرفی کردند. این شاخص مبتنی بر انتخاب ژنوتیپ‌های برتر که در آنها چندین صفت اندازه‌گیری شده است، می‌باشد.

صبوری و همکاران (Sabouri *et al.*, 2022) در آزمایش اثر تنش خشکی بر ژنوتیپ‌های برنج، روش ترکیب شاخص‌های معنی‌دار (Combination of significant indices; CSI) را معرفی نمودند. این شاخص یک ترکیب خطی از شاخص‌های تحمل یا حساسیت به تنش است که همبستگی معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون تنش دارد. برای استفاده از شاخص CSI

لازم است که از داده‌های استاندارد شده استفاده شود.

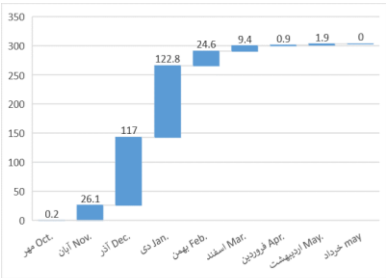
هدف از این تحقیق ارزیابی تحمل به تنش خشکی انتهای فصل در تعدادی از لاین‌های امیدبخش گندم دوروم برای توسعه کشت در منطقه داراب استان فارس و مناطق با شرایط مشابه بوده است. برای این منظور از شاخص‌های تحمل به خشکی استفاده شد و به‌علاوه کارایی شاخص‌های SIIG، MGIDI و CSI جهت انتخاب مؤثرتر ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی مورد ارزیابی قرار گرفت.

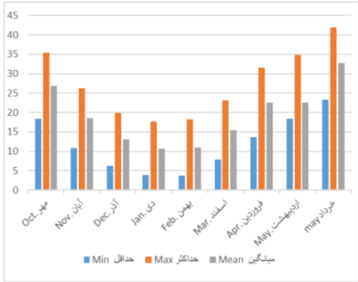
مواد و روش‌ها

در این تحقیق ۱۷ لاین امیدبخش گندم دوروم همراه با سه شاهد آران، هانا و مهرگان (جدول ۱) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی داراب در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و به مدت دو سال زراعی (۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۰۱-۱۴۰۰) در شرایط آبیاری کامل (بدون تنش) و تنش خشکی (قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی؛ کد ۶۰ زادوکس) مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به اینکه ژنوتیپ‌های گندم دوروم زودرس بودند (طول دوره رسیدگی آنها ۱۴۳ تا ۱۴۹ روز و طول دوره گل‌دهی آنها ۱۰۵-۱۱۰ روز بود)، قطع آبیاری برای کلیه ژنوتیپ‌ها به‌صورت هم‌زمان انجام شد. زمین محل اجرای آزمایش تحت تناوب دو ساله غلات- آیش بوده و عملیات تهیه زمین شامل شخم کلش بعد از برداشت محصول قبلی، شخم بهاره، تسطیح، کود پاشی و ایجاد ردیف‌های کاشت بود. برای کنترل بیماری سیاهک پنهان، بذرها قبل از کاشت با قارچ‌کش کربوکسین تیرام (دو در هزار) ضد عفونی شدند. میزان بذر مصرفی بر اساس ۴۵۰ بذر در مترمربع و با در نظر گرفتن وزن هزار دانه برای هر ژنوتیپ تعیین شد. کاشت بذرها در پانزدهم آبان در روی پشته‌ها و آبیاری با استفاده از نوار آبیاری (تیپ) انجام شد. هر کرت آزمایشی شامل شش ردیف کاشت پنج متری با فاصله ۲۰ سانتی‌متر بود. ۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر (از منبع فسفات آمونیوم)، ۲۵ کیلوگرم در هکتار پتاس (از منبع سولفات پتاس)، قبل از کاشت و ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (از منبع کود اوره) قبل از کاشت و سرک به خاک داده شدند. برای مبارزه با علف‌های هرز پهن برگ و باریک برگ، مخلوطی از علف‌کش‌های گرانستار و پوماسوپر، به‌ترتیب به مقدار ۲۰ گرم و یک لیتر در هکتار، در مرحله پنجه‌زنی تا طویل شدن ساقه، استفاده شد. اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش در شکل ۱ ارائه شده است.

ارزیابی واکنش ژنوتیپ‌های گندم دوروم به تنش خشکی براساس شاخص‌های تحمل (جدول ۲) و حساسیت و با استفاده از میانگین دو ساله داده‌ها انجام شد. به‌منظور انتخاب بهتر ژنوتیپ‌ها از نظر تحمل به تنش خشکی، شاخص‌های مورد استفاده ادغام و از شاخص‌های SIIG (Zali *et al.*, 2015; Zali *et al.*, 2023)، MGIDI (Olivoto and Nardino, 2020) و CSI (Sabouri *et al.*, 2022) استفاده شد. برای محاسبه شاخص SIIG و MGIDI علاوه بر عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش (Ys) و بدون‌تنش (Yp)، از شاخص‌هایی که همبستگی معنی‌داری با Yp و Ys داشتند، استفاده شد. برای محاسبه شاخص CSI تنها از شاخص‌هایی استفاده شده که همبستگی معنی‌داری با Yp و Ys داشتند.

2020-2021 ۱۴۰۰-۱۳۹۹

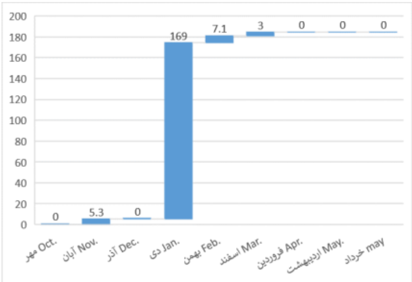


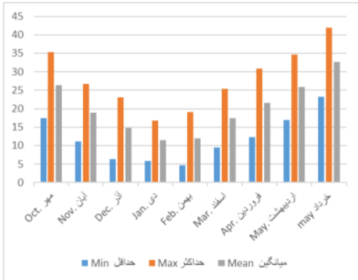


Perciperaction (mm) بارندگی

Temperacher (C°) دما

2021-2022 ۱۴۰۱-۱۴۰۰





Perciperaction (mm) بارندگی

Temperacher (C°) دما

شکل ۱- اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش (۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۰۱-۱۴۰۰)

Fig. 1. Meteorological information of the experiment site (2020-21 and 2021-22)

شاخص MGIDI براساس اطلاعات شاخص‌های جدول ۲ به‌ترتیب زیر محاسبه شد (Olivoto and Nardino, 2020):

۱- تغییر مقیاس صفات (شاخص‌ها): X_{ij} یک جدول دو طرفه با i ردیف یا ژنوتیپ و j ستون یا صفت می‌باشد. مقدار تغییر مقیاس یافته برای ردیف i و ستون j (rX_{ij}) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$rX_{ij} = \frac{\eta_{nj}-\varphi_{nj}}{\eta_{oj}-\varphi_{oj}} \times \left(\theta_{ij}-\eta_{oj}\right) + \eta_{nj}$$ (رابطه ۱)

φ_{oj} و η_{oj}: به‌ترتیب مقادیر اصلی حداقل و حداکثر برای صفت j در کلیه ژنوتیپ‌ها، φ_{nj} و η_{ni}: به‌ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر برای صفت j پس از تغییر مقیاس (Rescaling) و θ_{ij}: مقدار اصلی برای صفت jام از ژنوتیپ iام هستند. برای تغییر مقیاس، مقادیر η_{ni} و φ_{nj} به این‌صورت محاسبه شدند که برای صفاتی که در آن‌ها مقدار بالا مورد نظر است، φ_{nj} برابر با صفر و η_{ni} برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده و برای صفاتی که در آن‌ها مقدار پایین مورد نظر بود، φ_{nj} برابر با ۱۰۰ و η_{ni} برابر با صفر در نظر گرفته شد. در جدول دو طرفه تغییر مقیاس یافته (rX_{ij})، هر ستون دارای محدوده صفر تا ۱۰۰ است که مفهوم انتخاب مورد نظر (افزایش یا کاهش) را در نظر گرفته و ساختار همبستگی مجموعه اصلی متغیرها را حفظ می‌کند.

۲- تجزیه به عامل‌ها: تحلیل عاملی برای محاسبه کاهش ابعاد داده‌ها و ساختار روابط با استفاده از رابطه ۲ انجام شد:

$$F=Z(A^{T}R^{-1})^{T}$$ (رابطه ۲)

F: یک ماتریس g × f با مقادیر عامل‌ها، Z: یک ماتریس g × p با میانگین استاندارد شده (تغییر مقیاس یافته)، A : یک ماتریس p × f از بارگذاری متعارف (Canonical loadings) و R: یک ماتریس همبستگی

$p \times p$ بین صفات هستند. g، f و p: به‌ترتیب تعداد ژنوتیپ‌ها، عامل‌های باقیمانده (عامل‌هایی که مقدار ویژه آن‌ها بیشتر از یک است) و شاخص‌های محاسبه‌شده هستند.

۳- تعریف ژنوتیپ مطلوب (ایدئوتیپ): براساس رابطه ۱، ژنوتیپ مطلوب دارای بالاترین مقدار تغییر مقیاس (۱۰۰) برای صفاتی است که افزایش آنها مطلوب بوده و برای صفاتی که کاهش آنها مطلوب باشد، تغییر مقیاس صفر است. بر این اساس، ژنوتیپ مطلوب را می‌توان با یک بردار I [1×p] تعریف کرد که در آن I برابر ۱۰۰، ۱۰۰، ...، ۱۰۰ باشد. نمرات I نیز بر اساس رابطه (۲) تخمین زده شدند.

۴- محاسبه شاخص MGIDI: فاصله اقلیدسی بین نمرات ژنوتیپ‌ها و ژنوتیپ‌های مطلوب به‌عنوان شاخص MGIDI محاسبه شد (رابطه ۳):

$$\mathrm{MGIDI} = \sum_{i=1}^{f}\left[(\gamma_{ij} - \gamma_j)^2\right]^{0.5} \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

γ_{ij}: امتیاز i امین ژنوتیپ در فاکتور j ام است $(i = 1,2,\ldots,t;\ j = 1,2,\ldots,f)$ که t و f به‌ترتیب تعداد ژنوتیپ‌ها و عامل‌ها و γ_j: نمره jام ایدئوتیپ هستند. ژنوتیپ‌هایی با کمترین مقدار MGIDI به ژنوتیپ مطلوب نزدیک‌تر هستند. دیفرانسیل انتخاب برای همه شاخص‌ها با در نظر گرفتن شدت انتخاب، ۲۰ درصد در نظر گرفته شد.

به‌منظور ادغام شاخص‌های تحمل به خشکی (جدول ۲)، از شاخص SIIG به‌ترتیب زیر استفاده شد (Zali *et al.*, 2015; Zali *et al.*, 2023):

۱- تشکیل ماتریس داده‌ها: ماتریس داده‌ها به‌صورت رابطه ۴ تشکیل شد (ماتریس D).

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \qquad \text{(رابطه ۴)}$$

Xij: مقدار ژنوتیپ iام $(i = 1, 2, \ldots n)$ در رابطه با صفت (شاخص) jام $(j = 1, 2, \ldots m)$ است. در ماتریس، ردیف‌ها معادل ژنوتیپ‌ها و ستون‌ها معادل صفات/شاخص‌ها در نظر گرفته شدند.

۲- تبدیل ماتریس داده‌های اولیه (ماتریس D) به ماتریس استاندارد (ماتریس R) (رابطه ۵):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^2}} \qquad \text{(رابطه ۵)}$$

بعد از استاندارد کردن دادهای اولیه (ماتریس D)، ماتریس R تشکیل داده شد (رابطه ۶):

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \qquad \text{(رابطه ۶)}$$

۳- پیدا کردن ژنوتیپ مطلوب و ژنوتیپ غیرمطلوب (ضعیف) برای هر شاخص: با توجه به نوع شاخص مشخص شد که مقدار بالای یک شاخص مطلوب است یا مقادیر پایین آن. به‌عنوان مثال در مورد شاخص تحمل (TOL)، حداقل مقدار TOL یک ژنوتیپ مقدار مطلوب و بیشترین مقدار آن به‌عنوان غیرمطلوب (ضعیف) در نظر گرفته شد.

۴- محاسبه فاصله از ژنوتیپ‌های مطلوب (d_i^+) و ژنوتیپ‌های ضعیف (d_i^-): در این مرحله برای هر ژنوتیپ، فاصله از ژنوتیپ‌های مطلوب (d_i^+) و ژنوتیپ‌های ضعیف (d_i^-) محاسبه شدند (به‌ترتیب رابطه‌های ۷ و ۸).

(رابطه ۷)

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(r_{ij} - r_j^+\right)^2} \qquad i = 1, 2 \ldots, n$$

(رابطه ۸)

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(r_{ij} - r_j^-\right)^2} \qquad i = 1, 2 \ldots, n$$

r_{ij}: مقدار استاندارد شده ژنوتیپ iام $(i = 1, 2, \ldots n)$ در رابطه با شاخص jام $(j = 1, 2, \ldots m)$، r_j^+ و r_j^-

به‌ترتیب مقادیر استاندارد شده ژنوتیپ‌های مطلوب و ژنوتیپ‌های ضعیف برای هر شاخص jام (j = 1, 2, … m) هستند.

۵- محاسبه شاخص انتخاب ژنوتیپ مطلوب (SIIG): برای محاسبه شاخص انتخاب ژنوتیپ مطلوب برای هر ژنوتیپ از رابطه ۹ استفاده شد:

(رابطه ۹)

$$SIIG_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad i = 1, 2 \dots, n, \quad 0 \leq SIIG_i \leq 1$$

مقدار $SIIG_i$ بین صفر تا یک است و هر چه گزینه مورد نظر به ژنوتیپ مطلوب نزدیک‌تر باشد، مقدار $SIIG_i$ آن به یک نزدیک‌تر خواهد بود. بر این اساس، بهترین ژنوتیپ، نزدیک‌ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ‌های مطلوب و دورترین آنها نسبت به ژنوتیپ‌های ضعیف است (Zali *et al.*, 2015; Zali *et al.*, 2023).

شاخص CSI برمبنای ترکیب خطی شاخص‌هایی که همبستگی معنی‌داری با Yp و Ys دارند، محاسبه می‌شود (رابطه ۱۰).

$$CSI_i = \frac{1}{2}\left(\sum_j^n r_{YP.index_j} \times index_{ij} + \sum_j^n r_{YS.index_j} \times index_{ij}\right) \qquad \text{(رابطه ۱۰)}$$

$r_{YP}.index_j$: نشان‌دهنده همبستگی بین شاخص j و Yp و $r_{YS}.index_j$: همبستگی بین شاخص j و Ys، $index_{ij}$: مقدار شاخص j در ژنوتیپ i هستند. برای محاسبه شاخص CSI، ابتدا شاخص‌های معنی‌دار با استفاده از رابطه ۵ استاندارد شدند (شاخص‌های معنی‌دار، شاخص‌هایی هستند که همبستگی معنی‌داری با عملکرد دانه در هر دو شرایط تنش و بدون‌تنش دارند). بر مبنای شاخص CSI ژنوتیپ‌هایی برتر هستند که بیشترین مقدار را داشته باشند (Sabouri *et al.*, 2022).

تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد. برای محاسبه شاخص SIIG از برنامه تهیه شده در محیط برنامه‌نویسی R (Zali *et al.*, 2023) و برای محاسبه شاخص MGIDI و همبستگی بین شاخص‌ها از بسته تجزیه آزمایش‌های چند محیطی (metan) در محیط برنامه‌نویسی R استفاده شد (Olivoto and Nardino, 2020). برای محاسبه شاخص‌های تحمل/ حساسیت به خشکی و شاخص CSI (Sabouri *et al.*, 2022) از نرم افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه در شرایط بدون‌تنش و تنش خشکی انتهای فصل نشان داد که اثر سال، محیط و ژنوتیپ برای عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. نقشه حرارتی ژنوتیپ‌های گندم دوروم در دو سال و در شرایط تنش و بدون‌تنش نتایج نشان داد که کمترین عملکرد دانه مشاهده شده مربوط به شرایط تنش در سال اول و بیشترین مقدار مشاهده شده مربوط به سال دوم و در شرایط بدون‌تنش بود (شکل ۲).

نتایج نشان داد که بیشترین مقدار عملکرد دانه در شرایط بدون‌تنش (Yp) به‌ترتیب مربوط به ژنوتیپ‌های ۲ (۸۱۷۸)، ۱ (۷۹۳۸)، ۱۷ (۷۶۹۸)، ۱۹ (۷۶۶۲)، ۱۸ (۷۶۵۹)، ۱۴ (۷۴۵۱) و ۱۰ (۷۴۱۳) و کمترین مقدار آن مربوط به لاین ۹ (۵۸۵۳) (کیلوگرم در هکتار) بود. بیشترین مقدار عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی (Ys) به‌ترتیب مربوط به لاین‌های ۱۸ (۵۶۳۹)، ۴ (۵۴۸۹)، ۸ (۵۴۷۹)، ۱۰ (۵۴۷۳)، ۱۳(۵۴۳۴) و ۶ (۵۴۰۴) و کمترین مقدار آن به‌ترتیب مربوط به لاین‌های ۹ (۴۶۵۸) و ۱۲(۴۷۱۴) (کیلوگرم در هکتار)

جدول ۱- شجره ارقام و لاین‌های گندم دوروم مورد بررسی

Table 1. Pedigree of examined durum wheat cultivars and promising lines

ژنوتیپ‌های گندم دوروم Durum wheat genotypes	منشاء Origin	شجره Pedigree
G1	Aran (CH_1) - 41th IDYN	RASCON_37/4/MAGH72/RUFO//ALG86/RU/3/PLATA_16/5/PORTO_3*2/6/ARMENT//SRN_3/NIGRIS_4/3/CANELO_9.1
G2	Hana (CH_2) - 40th IDSN	INTER_16/SNITAN/9/USDA595/3/D67.3/RABI//CRA/4/ALO/5/HUI/YAV_1/6/ARDENTE/7/HUI/YAV79/8/POD_9
G3	Mehregan (CH_3) - CIMMYT	OASIS/SKAUZ//4*BCN/3/2*PASTOR
G4	49th IDYN (CIMMYT)	GERUFTEL-1//GUAYACAN INIA/2*SNITAN
G5	49th IDYN (CIMMYT)	CEMEXI C 2008/5/2*GUAYACAN INIA/POMA_2//SNITAN/4/D86135/ACO89// PORRON_4/3/SNITAN
G6	49th IDYN (CIMMYT)	ALTAR 84/BINTEPE85/3/STOT//ALTAR84/ALD/4/POD_11/YAZI_1/5/VANRRIKSE_12/SNITAN/6/SOOTY_9/RASCON_37//WODUCK/CHAM_3/10/CHEN_1/TEZ/3/GUIL//CIT71/CII/4/SORA /PLATA_12/5/STOT//ALTAR 84/ALD/9/USDA595/3/D67.3/RABI//CRA/4/ALO/5/HUI/YAV_1/6/ ARDENTE/7/HUI/ YAV79
G7	49th IDYN (CIMMYT)	TUNSYR-2/6/ALTAR 84/STINT//SILVER_45/3/GUANAY/4/GREEN_14//YAV_10/AUK/5/ SOMAT_4/ INTER_8/10/SWAHEN_2/KIRKI_8//PROZANA_1/4/ADAMAR_15//ALBIA_1/ALTAR 84/3/SNITAN/9/ GUAYACAN INIA/GUANAY/8/GEDIZ/FGO//GTA/3/SRN_1/4/TOTUS/5/ ENTE/MEXI_2//HUI/4/ YAV_1/3/LD357E/2
G8	49th IDSN (CIMMYT)	CEMEXI C 2008/5/2*GUAYACAN INIA/POMA_2//SNITAN/4/D86135/ACO89//PORRON_4/3/SNITAN
G9	49th IDSN (CIMMYT)	CIRNO C 2008/5/CMH85.797//CADO/BOOMER_33/4/ARMENT//SRN_3/NIGRIS_4/3/CANELO_9.1
G10	49th IDSN (CIMMYT)	SOMAT_3/PHAX_1//TILO_1/LOTUS_4/3/GUANAY/5/NETTA_4/DUKEM_12//RASCON_19/3/SORA/2*PLATA_12/4/GREEN_18/FOCHA_1//AIRON_1/6/PLATA_6/GREEN_17/3/CHEN/AUK//BISU*2/5/PLATA_3//CREX/ALLA/3/SOMBRA_20/4/SILVER_14/MOEWE
G11	49th IDSN (CIMMYT)	SWAHEN_2/KIRKI_8//PROZANA_1/4/ADAMAR_15//ALBIA_1/ALTAR84/3/SNITAN/9/GUAYACANINIA/GUANAY/8/GEDIZ/FGO//GTA/3/SRN_1/4/TOTUS/5/ENTE/MEXI_2//HUI/4/YAV_1/3/LD357E/2*TC60//JO69/6/SOMBRA_20/7/JUPARE C 2001/10/PLATA_6/GREEN_17/3/CHEN/AUK//BISU*2/5/PLATA_3//
G12	49th IDSN (CIMMYT)	MOHAWK/6/LOTUS_5/F3LOCAL(SEL.ETHIO.135.85)/5/CHEN/ALTAR 84/3/HUI/POC//BUB/ RUFO /4/FNFOOT/7/SORA/2*PLATA_12/3/SORA/2*PLATA_12//SOMAT_3/4/AJAIA_13/YAZI //DIPPER_2/BUSHEN_3
G13	49th IDSN (CIMMYT)	GEROMTEL-3/5/ARMENT//2*SOOTY_9/RASCON_37/4/CNDO/PRIMADUR//HAI-OU_17/3/SNITAN
G14	49th IDSN (CIMMYT)	MÂALI/5/1A.1D5+106/3*MOJO//RCOL/4/ARMENT//SRN_3/NIGRIS_4/3/CANELO_9.1/11/SELIM/10/RCOL/THKNEE_2/9/USDA595/3/D67.3/RABI//CRA/4/ALO/5/HUI/YAV_1/6/ARDENTE/7/HUI/YAV79/8/POD_9
G15	CIMMYT	ASA DE CORVO/4/ATIL/3/KNIPA/TAGUA//PLANETA/TRILE
G16	CIMMYT	ALTAR 84/STINT//SILVER_45/3/GUANAY/4/GREEN_14//YAV_10/AUK/5/GUAYACAN INIA/YEBAS_8 /3/TOPDY_18/FOCHA_1//ALTAR 84/6/CBC 514 CHILE/3/AUK/GUIL//GREEN
G17	CIMMYT	CBC 509 CHILE/6/ECO/CMH76A.722//BIT/3/ALTAR 84/4/AJAIA_2/5/KJOVE_1/7/AJAIA_12/F3LOCAL (SEL.ETHIO.135.85)//PLATA_13/8/SOOTY_9/RASCON_37// WODUCK/CHAM_3*2/9/HUBEI// SOOTY_9/RASCON_37/3/2*SOOTY_9/RASCON_37/4/2*SOOTY_9/RASCON_37
G18	CIMMYT	SARAGOLLA/12/SOOTY_9/RASCON_37/3/SOOTY_9/TARRO_1//AJAIA_2/10/PLATA_10/6/MQUE/4/USDA573//QFN/AA_7/3/ALBAD/5/AVO/HUI/ 7/PLATA_13/8/THKNEE_11/9/CHEN/ALTAR 84/3/HUI /POC//BUB/RUFO/4/FNFOOT/11/RISSA/GAN//POHO_1/3/PLATA_3//CREX/ALLA/4/JUPARE C 2001/5/ARMENT
G19	CIMMYT	T.DIC 1460/MEXI75//MEXI75/T.MONOC.2433/3/CEMEXI C 2008/4/SOOTY_9/RASCON_37
G20	41st IDYT (ICARDA)	Ter1//Mrf1/Stj2/3/lcasyr1

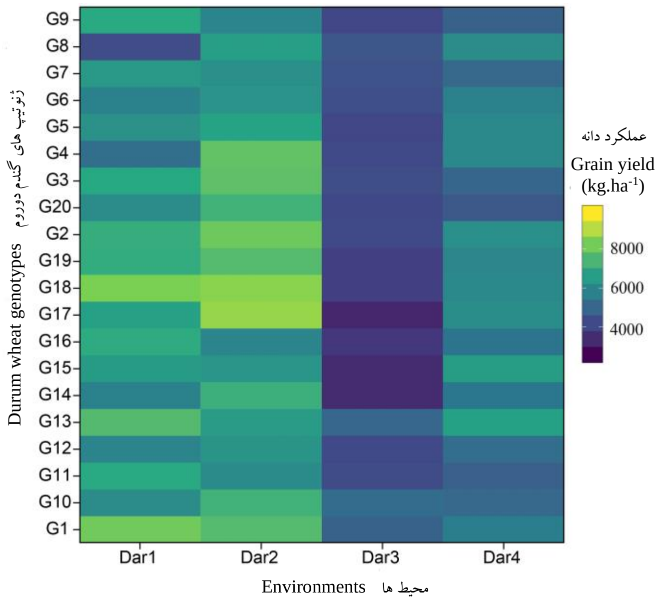
41th IDYN (CIMMYT): چهل و یکمین آزمایشات بین‌المللی IDYN سیمیت؛ 41th IDSN (CIMMYT): چهل و یکمین آزمایشات بین‌المللی IDSN سیمیت؛ 49th IDYN (CIMMYT): چهل و نهمین آزمایشات بین‌المللی IDYN سیمیت؛ 49th IDSN (CIMMYT): چهل و نهمین آزمایشات بین‌المللی IDSN سیمیت؛ 41st IDYT (ICARDA): چهل و یکمین آزمایشات بین‌المللی ایکاردا؛ IDYN: خزانه بین‌المللی گندم دوروم؛ IDSN: خزانه بین المللی مشاهده‌ای گندم دوروم؛ CIMMYT: مرکز بین‌المللی تحقیقات ذرت و گندم؛ ICARDA: مرکز بین‌المللی تحقیقات کشاورزی در مناطق خشک

41th IDYN (CIMMYT): CIMMYT′s 41th IDNT; 41th IDSN (CIMMYT): CIMMYT′s 41th IDSN; 49th IDYN (CIMMYT): CIMMYT′s 41th IDYN; 49th IDSN (CIMMYT): CIMMYT′s 41th IDSN; 41st IDYT (ICARDA): ICARDA′s 41st IDYT; IDYN: International Durum Yield Nursery; IDSN: International Durum Screening Nursery; IDYT: International Durum Yield Trail; CIMMYT; International Maize and Wheat Improvement Center; ICARDA: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas

جدول ۲- شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی

Table 2. Drought tolerance and susceptibility indices

Drought tolerance and susceptibility indices	شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی		Reference منبع
Tolerance index (TOL)	شاخص تحمل	$TOL = Y_p - Y_s$	(Rosielle and Hamblin, 1981)
Mean productivity (MP)	شاخص میانگین بهره‌وری	$MP = \frac{Y_p + Y_s}{2}$	(Rosielle and Hamblin, 1981)
Stress index (SSI)	شاخص حساسیت به تنش	$SSI = \frac{1 - \frac{Y_{si}}{Y_{pi}}}{SI}, \quad SI = 1 - \frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_p}$	(Fischer and Maurer, 1978)
Geometric mean productivity (GMP)	میانگین هندسی بهره‌وری	$GMP = \sqrt{Y_p \times Y_s}$	(Fernandez, 1992)
Stress tolerance index (STI)	شاخص تحمل به تنش	$STI = \frac{Y_p \times Y_s}{(\bar{Y}_p)^2}$	(Fernandez, 1992)
Harmonic mean (HM)	میانگین هارمونیک عملکرد	$HM = \frac{2(Y_p \times Y_s)}{Y_p + Y_s}$	(Fernandez, 1992)
Relative drought index (RDI)	شاخص خشکی نسبی	$RDI = \frac{Y_s / Y_p}{\bar{Y}_s / \bar{Y}_p}$	(Fischer and Wood, 1979)
Abiotic-stress tolerance index (ATI)	شاخص تحمل غیرزیستی	$ATI = \left[\left(\frac{Y_p - Y_s}{\bar{Y}_p / \bar{Y}_s}\right)\right] \times [\sqrt{Y_p \times Y_s}]$	(Moosavi *et al.*, 2008)
Stress susceptibility percentage index (SSPI)	شاخص درصد حساسیت به تنش	$SSPI = \frac{Y_p - Y_s}{2(\bar{Y}_p)} \times 100$	(Moosavi *et al.*, 2008)
Stress non-stress production index (SNPI)	شاخص تولید در شرایط تنش و بدون‌تنش	$SNPI = \sqrt[3]{\frac{(Y_p + Y_s)}{(Y_p - Y_s)}} \times \sqrt[3]{Y_p \times Y_s \times Y_s}$	(Moosavi *et al.*, 2008)
Yield stability index (YSI)	شاخص پایداری عملکرد	$YSI = \frac{Y_s}{Y_p}$	(Bouslama and Schapaugh, 1984)
Percentage of yield reduction (%R)	درصد کاهش عملکرد	$\%R = \frac{Y_p - Y_s}{Y_p} \times 100$	(Choukan *et al.*, 2006)
Yield index (YI)	شاخص عملکرد	$YI = \frac{Y_s}{\bar{Y}_s}$	(Gavuzzi *et al.*, 1997)



شکل ۲- نقشه حرارتی پراکنش عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم دوروم در شرایط بدون تنش و تنش خشکی انتهای فصل

Dar: ایستگاه داراب، اعداد ۱ و ۲: به‌ترتیب سال اول (۱۴۰۰-۱۳۹۹) و سال دوم (۱۴۰۱-۱۴۰۰) در شرایط بدون‌تنش؛ اعداد ۳ و ۴: به‌ترتیب سال اول (۱۴۰۰-۱۳۹۹) و سال دوم (۱۴۰۰-۱۳۹۹) در شرایط تنش خشکی

Fig. 2. Heat map of grain yield distribution of durum wheat genotypes under normal and terminal drought stress conditions

Dar: Station of Darab; 1 and 2: Normal conditions in the first year (2020-2021) and the second year (2021-2022); 3 and 4: Drought stress conditions in the first year (2020-2021) and the second year (2021-2022)

بود. نتایج نشان داد در شرایط بدون‌تنش عملکرد دانه هیچ کدام از لاین‌ها از ارقام شاهد ۱ و ۲ بالاتر نبود، اما در شرایط تنش خشکی عملکرد لاین‌های ۱۸، ۴، ۸، ۱۰، ۱۳، ۶ و ۱۷ از هر سه رقم شاهد بالاتر بود که این موضوع نشان دهنده برتری برخی از لاین‌های گندم دوروم در شرایط تنش خشکی نسبت به ارقام شاهد بود (جدول ۳).

برمبنای شاخص‌های TOL، ATI و SSPI، ژنوتیپ‌هایی که دارای کمترین مقدار این شاخص‌ها باشند، حساسیت کمتری نسبت به تنش دارند. از این رو لاین‌های ۹، ۴، ۱۲ و ۱۵ با کمترین مقدار این شاخص‌ها، جزء ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی انتهای فصل شناخته شدند. نتایج نشان داد براساس این شاخص‌ها، لاین‌های پرمحصول شناسایی نشدند و لاین‌های انتخابی با سه روش یاد شده، پتانسیل عملکرد دانه پایینی در هر دو شرایط بدون‌تنش و تنش خشکی داشتند (جدول ۳). موسوی و همکاران (Moosavi *et al.*, 2008) گزارش کردند که با استفاده از شاخص‌های ATI و SSPI، می‌توان ژنوتیپ‌های گندم دارای تحمل نسبی در شرایط تنش را شناسایی کرد. برمبنای شاخص‌های SSI و درصد کاهش عملکرد (R%)، لاین‌های ۴ و ۸، به‌ترتیب با کمترین مقدار این شاخص‌ها، جزء ژنوتیپ‌های برتر متحمل به تنش شناخته شدند. این دو لاین دارای رتبه عملکرد دانه بالا در شرایط تنش و رتبه عملکرد دانه پایین در شرایط بدون‌تنش بودند. در ضمن لاین‌های ۹، ۱۵، ۲۰ و ۱۲ که به‌ترتیب در مرتبه بعدی از نظر تحمل به خشکی بودند، دارای عملکرد دانه پایین‌تر از میانگین کل در هر دو شرایط بودند. نتایج مربوط به شاخص‌های YSI و RDI با شاخص‌های SSI و درصد کاهش عملکرد (R%) مطابقت کامل داشت، با این تفاوت که در شاخص‌های YSI و RDI ژنوتیپ‌هایی که بیشترین

مقـدار را داشـته باشـند، بـه‌عنـوان ژنوتیـپ‌هـای متحمـل به خشکی محسوب می‌شوند (جدول ۳). با توجه به این‌کـه شـاخص YSI کـه از نسـبت عملکـرد یـک رقـم در شرایط تنش به میانگین عملکرد کلیه ارقام در شرایط تـنش محاسـبه مـی‌شـود، باعـث می‌شـود کـه رتبـه‌بنـدی ارقـام برحسب میزان عملکرد آن‌هـا در محـیط تـنش انجـام شـود (Sio-Se Mardeh *et al.*, 2006). برمبنای شـاخص‌هـای SSI و TOL امکـان دارد ژنوتیـپ‌هـایی انتخـاب شـوند کـه دارای رتبـه عملکـرد دانـه پـایین در شـرایط بـدون تـنش و رتبـه عملکـرد دانـه بـالا در شـرایط تـنش باشـند (Fernandez, 1992)، بنابراین ممکن است ایـن شـاخص‌هـا در شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکـرد بـالا، کـارایی کمتـری داشته باشند. شاخص SSI برای اصلاح ارقام در تـنش‌هـایی با شدت کم مناسب اسـت، در صـورتی‌کـه شـاخص‌هـای MP، GMP و STI برای تـنش‌هـایی بـا شـدت بـالا پیشـنهاد شده‌اند (Sio-Se Mardeh *et al.*, 2006).

نتایج مربوط به شـاخص‌هـای MP، GMP و HM نشـان داد که ژنوتیپ‌های ۲، ۱۸، ۱، ۱۷ و ۱۰ به‌ترتیب با بیشـترین مقـدار ایـن شـاخص‌هـا، جـزء ژنوتیـپ‌هـای برتـر بودنـد. ژنوتیپ‌های انتخابی با این شـاخص‌هـا از پتانسـیل عملکـرد دانه بالایی در هر دو شرایط تنش و بـدون تـنش برخـوردار بودند. نتایج مربوط به شاخص STI با نتایج این سه شـاخص مطابقت کامل داشت (جـدول ۳). در عـین حـال، براسـاس گزارش فرناندز (Fernandez, 1992)، کارایی شـاخص MP پایین بوده و براساس این شـاخص نمـی‌تـوان ژنوتیـپ‌هـای متحمل با عملکرد بالا را به‌طور همزمان در شـرایط تـنش و بـدون تـنش، تفکیـک کـرد. نتـایج نشـان داد کـه بیشـترین مقدار شاخص YI، به‌ترتیب مربوط بـه لاین‌هـای ۱۸، ۴، ۸، ۱۰ و ۱۳ بود. در این شاخص ژنوتیپ‌هـا براسـاس عملکـرد دانـه در شـرایط تـنش انتخـاب مـی‌شـوند (جـدول ۳). بـه گـزارش گـاووازی و همکـاران (Gavuzzi *et al.*, 1997)، شـاخص YI بـرای گـزینش ارقـام گـروه A (ژنوتیـپ‌هـای دارای عملکـرد بـالا در شـرایط تـنش و بـدون تـنش) (Fernandez, 1992) کـارایی نـدارد. بـر مبنـای شـاخص SNPI، ژنوتیپ‌هایی که دارای مقدار بیشتری باشـند، دارای تحمل نسبی به خشکی بوده و ژنوتیپ‌هایی کـه مقـدار ایـن شاخص در آنها کمتـر باشـد، حساسـیت نسـبی بـه خشـکی دارند (Moosavi *et al.*, 2008)، بر ایـن اسـاس لاین‌هـای ۴، ۸، ۱۸، ۱۳ و ۶ به‌ترتیب بیشترین مقـدار SNPI را داشـته و از نظـر تحمـل بـه خشـکی برتـر بودنـد (جـدول ۳). در ایـن شاخص، ژنوتیپ‌ها براساس عملکرد دانـه در شـرایط تـنش رتبه‌بندی می‌شوند. استفاده از شـاخص‌هـای SNPI، ATI و SSPI در ارزیـابی تحمـل بـه خشـکی ارقـام گنـدم دوروم (Mohammadnia *et al.*, 2017) و کلـزا (Zali *et al.*, 2017) نیز گزارش شده است.

بـه‌منظـور انتخـاب ژنوتیـپ‌هـای متحمـل بـه خشـکی برمبنای شـاخص‌هـای مـورد بررسـی، از شـاخص MGIDI استفاده شد (جدول ۳ و شکل ۳). در شکل ۳، ژنوتیپ‌هـای انتخاب‌شده با اسـتفاده از شـاخص MGIDI بـا رنـگ قرمـز نشـان داده شـده‌انـد و خـارج از دایـره قرمـز مرکـزی قـرار دارند. دایره قرمز مرکزی نقطـه بـرش را بـا توجـه به‌شـدت انتخـاب (۲۰ درصـد) نشـان مـی‌دهـد. در ایـن تحقیـق، بـرای محاسـبه شـاخص MGIDI عـلاوه بـر Yp و Ys، از شاخص‌های تحمل به خشـکی کـه بـا Yp و Ys همبسـتگی معنـی‌داری داشـتند (MP، GMP، HM، STI و YI) نیـز استفاده شد. بنابراین ارزش ژنوتیپ‌ها بـر اسـاس بـالا بـودن مقـدار شـاخص‌های Yp، Ys، MP، GMP، HM، STI و YI (جدول ۳) محاسبه شد. در شاخص MGIDI ژنوتیـپ‌هـایی بـا کمتـرین مقـدار، مطلـوب‌ترین ژنوتیـپ‌هـا محسـوب می‌شـوند، بنـابراین، لاین‌هـای ۱۸، ۲، ۱۰ و ۱۷ بـه‌ترتیـب جزء ژنوتیـپ‌هـای متحمـل بـه خشـکی براسـاس شـاخص MGIDI شناخته شدند (شـکل ۳). بـر مبنـای ایـن شـاخص، لاین ۱۸ برتر از ارقام شـاهد بـوده و لاین‌هـای ۱۰ و ۱۷ نیـز از ارقام شـاهد ۱ (آران) و ۳ (مهرگـان) برتـر بودنـد. نتـایج همبسـتگی بـین شـاخص‌هـای مـورد بررسـی و شـاخص MGIDI نشـان داد کـه ایـن شـاخص همبسـتگی منفـی و معنی‌داری با Yp ($r= -0/87^{**}$) و Ys ($r= -0/86^{**}$) داشـت (شکل ۴).

جدول ۳- میانگین عملکرد دانه و رتبه‌بندی شاخص‌های تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های گندم دوروم در تیمارهای بدون تنش و تنش خشکی انتهای فصل

Table 3. Mean of grain yield and drought tolerance indices ranking of durum wheat genotypes under normal and terminal drought stress conditions

ژنوتیپ‌های گندم دوروم Durum wheat genotypes	شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی Drought tolerance and susceptibility indices								
	YP	YS	TOL	MP	SSI	GMP	HM	STI	RDI
G1	7938 (2)*	5198 (11)	2740 (19)	6568 (3)	1.30 (18)	6423 (3)	6282 (5)	0.833 (3)	0.89 (18)
G2	8178 (1)	5266 (8)	2911 (20)	6722 (1)	1.34 (20)	6562 (2)	6407 (2)	0.870 (2)	0.88 (20)
G3	6820 (12)	5246 (9)	1574 (7)	6033 (12)	0.87 (7)	5982 (12)	5931 (12)	0.723 (12)	1.05 (7)
G4	6747 (14)	5489 (2)	1258 (2)	6118 (11)	0.70 (1)	6086 (10)	6054 (10)	0.748 (10)	1.11 (1)
G5	6977 (10)	4829 (18)	2148 (15)	5903 (15)	1.16 (15)	5805 (15)	5708 (16)	0.681 (15)	0.94 (15)
G6	7081 (9)	5404 (6)	1676 (10)	6242 (8)	0.89 (10)	6186 (8)	6130 (7)	0.773 (8)	1.04 (10)
G7	6641 (17)	4869 (17)	1772 (11)	5755 (18)	1.01 (13)	5686 (18)	5618 (18)	0.653 (18)	1.00 (13)
G8	6879 (11)	5479 (3)	1400 (5)	6179 (10)	0.77 (2)	6140 (9)	6100 (8)	0.761 (9)	1.08 (2)
G9	5853 (20)	4658 (20)	1195 (1)	5256 (20)	0.77 (3)	5221 (20)	5188 (20)	0.551 (20)	1.08 (3)
G10	7413 (7)	5473 (4)	1941 (13)	6443 (5)	0.99 (11)	6370 (5)	6297 (3)	0.820 (5)	1.00 (11)
G11	6761 (13)	5180 (12)	1581 (8)	5971 (13)	0.88 (8)	5918 (13)	5866 (14)	0.707 (13)	1.04 (8)
G12	6012 (19)	4714 (19)	1298 (3)	5363 (19)	0.81 (6)	5323 (19)	5284 (19)	0.572 (19)	1.07 (6)
G13	7101 (8)	5434 (5)	1667 (9)	6268 (7)	0.89 (9)	6212 (6)	6157 (6)	0.779 (6)	1.04 (9)
G14	7451 (6)	4928 (15)	2523 (17)	6190 (9)	1.28 (17)	6060 (11)	5933 (11)	0.742 (11)	0.90 (17)
G15	6481 (18)	5113 (13)	1368 (4)	5797 (17)	0.80 (4)	5756 (16)	5716 (15)	0.669 (16)	1.07 (4)
G16	6698 (15)	4909 (16)	1789 (12)	5804 (16)	1.01 (14)	5734 (17)	5666 (17)	0.664 (17)	1.00 (14)
G17	7698 (3)	5325 (7)	2373 (16)	6511 (4)	1.16 (16)	6402 (4)	6295 (4)	0.828 (4)	0.94 (16)
G18	7659 (5)	5639 (1)	2020 (14)	6649 (2)	1.00 (12)	6572 (1)	6495 (1)	0.872 (1)	1.00 (12)
G19	7672 (4)	5015 (14)	2657 (18)	6344 (6)	1.31 (19)	6203 (7)	6065 (9)	0.777 (7)	0.89 (19)
G20	6661 (16)	5242 (10)	1420 (6)	5952 (14)	0.80 (5)	5909 (14)	5867 (13)	0.705 (14)	1.07 (5)

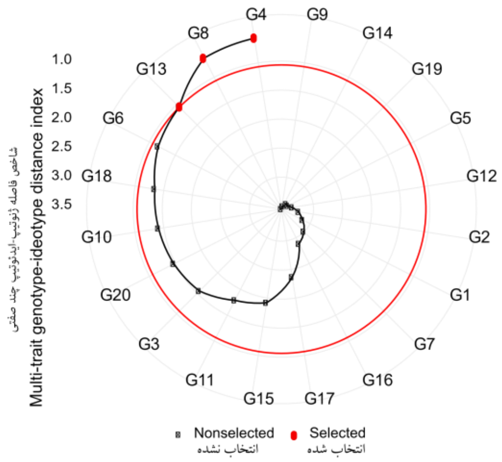
جدول ۳- ادامه

Table 3. Continued

ژنوتیپ‌های گندم دوروم Durum wheat genotypes	شاخص‌های تحمل و حساسیت به خشکی Drought tolerance and susceptibility indices						شاخص‌های انتخاب Selection indices		
	ATI	SSPI	SNPI	YSI	%R	YI	SIIG	MGIDI	CSI
G1	12936274 (19)*	19.5 (19)	10093 (16)	0.65 (18)	34.5 (18)	1.005 (11)	0.809 (4)	0.86 (5)	1.003 (5)
G2	14041200 (20)	20.7 (20)	10155 (15)	0.64 (20)	35.6 (20)	1.018 (8)	0.869 (2)	0.50 (2)	1.028 (2)
G3	6917809 (8)	11.2 (7)	11291 (8)	0.77 (7)	23.1 (7)	1.015 (9)	0.524 (12)	1.78 (11)	0.933 (12)
G4	5625736 (3)	8.9 (2)	12553 (1)	0.81 (1)	18.6 (1)	1.062 (2)	0.595 (10)	1.35 (9)	0.958 (10)
G5	9161426 (14)	15.3 (15)	9636 (19)	0.69 (15)	30.8 (15)	0.934 (18)	0.399 (15)	2.51 (16)	0.892 (16)
G6	7621168 (12)	11.9 (10)	11548 (5)	0.76 (10)	23.7 (10)	1.045 (6)	0.665 (7)	1.21 (7)	0.971 (7)
G7	7403684 (9)	12.6 (11)	10075 (17)	0.73 (13)	26.7 (13)	0.942 (17)	0.316 (18)	2.74 (18)	0.875 (18)
G8	6315776 (6)	9.9 (5)	12217 (2)	0.80 (2)	20.3 (2)	1.060 (3)	0.631 (9)	1.24 (8)	0.966 (8)
G9	4585749 (1)	8.5 (1)	10376 (12)	0.80 (3)	20.4 (3)	0.901 (20)	0.000 (20)	3.92 (20)	0.797 (20)
G10	9084174 (13)	13.8 (13)	11382 (7)	0.74 (11)	26.2 (11)	1.058 (4)	0.793 (5)	0.75 (3)	1.003 (4)
G11	6875754 (7)	11.2 (8)	11108 (10)	0.77 (8)	23.4 (8)	1.002 (12)	0.479 (13)	1.97 (14)	0.921 (14)
G12	5079480 (2)	9.2 (3)	10334 (13)	0.78 (6)	21.6 (6)	0.912 (19)	0.068 (19)	3.65 (19)	0.814 (19)
G13	7608842 (11)	11.8 (9)	11640 (4)	0.77 (9)	23.5 (9)	1.051 (5)	0.683 (6)	1.12 (6)	0.976 (6)
G14	11233946 (17)	17.9 (17)	9612 (20)	0.66 (17)	33.9 (17)	0.953 (15)	0.570 (11)	1.87 (12)	0.935 (11)
G15	5788870 (4)	9.7 (4)	11281 (9)	0.79 (4)	21.1 (4)	0.989 (13)	0.369 (16)	2.38 (15)	0.893 (15)
G16	7540268 (10)	12.7 (12)	10155 (14)	0.73 (14)	26.7 (14)	0.949 (16)	0.349 (17)	2.60 (17)	0.883 (17)
G17	11167255 (16)	16.9 (16)	10620 (11)	0.69 (16)	30.8 (16)	1.030 (7)	0.814 (3)	0.80 (4)	1.004 (3)
G18	9756178 (15)	14.4 (14)	11704 (3)	0.74 (12)	26.4 (12)	1.090 (1)	0.903 (1)	0.18 (1)	1.041 (1)
G19	12111167 (18)	18.9 (18)	9731 (18)	0.65 (19)	34.6 (19)	0.970 (14)	0.665 (8)	1.49 (10)	0.961 (9)
G20	6165512 (5)	10.1 (6)	11534 (6)	0.79 (5)	21.3 (5)	1.014 (10)	0.475 (14)	1.94 (13)	0.922 (13)

Yp: عملکرد دانه در شرایط بدون تنش؛ Ys: عملکرد دانه در شرایط تنش؛ TOL: شاخص تحمل؛ SSI: شاخص حساسیت به تنش؛ MP: میانگین بهره‌وری؛ GMP: میانگین هندسی بهره‌وری؛ STI: شاخص تحمل تنش؛ HM: میانگین هارمونیک؛ %R: درصد کاهش عملکرد؛ YI: شاخص عملکرد؛ YSI: شاخص پایداری عملکرد؛ RDI: شاخص خشکی نسبی؛ ATI: شاخص تحمل غیرزیستی؛ SSPI: شاخص درصد حساسیت به تنش؛ SNPI: شاخص تولید در شرایط بدون تنش و تنش؛ SIIG: شاخص انتخاب ژنوتیپ مطلوب؛ MGIDI: شاخص فاصله ژنوتیپ- ایدئوتیپ چند صفتی؛ CSI: شاخص ترکیب شاخص‌های معنی‌دار. *: اعداد داخل پرانتزها مربوط به رتبه ژنوتیپ‌ها از نظر شاخص‌های مورد بررسی هستند

Yp: Yield under non-stress condition; Ys: Yield under stress condition; TOL: Tolerance index; SSI: Stress susceptibility index; MP: Mean Productivity; GMP: Geometric mean productivity; STI: Stress tolerance index; HM: Harmonic mean; %R: Percentage of yield reduction; YI: Yield index; YSI: Yield stability index; RDI: Relative drought index; ATI: Abiotic-stress tolerance index; SSPI: Stress susceptibility percentage index; SNPI: Stress non-stress production index; SIIG: selection index of ideal genotype; CSI: combination of significant indices; MGIDI: multi-trait genotype-ideotype distance index. *: Numbers in the parentheses are the rank of the genotypes in terms of those indices



شکل ۳- الگوی رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های گندم دوروم بر اساس شاخص MGIDI

Fig. 3. Ranking of durum wheat genotypes based on the MGIDI index

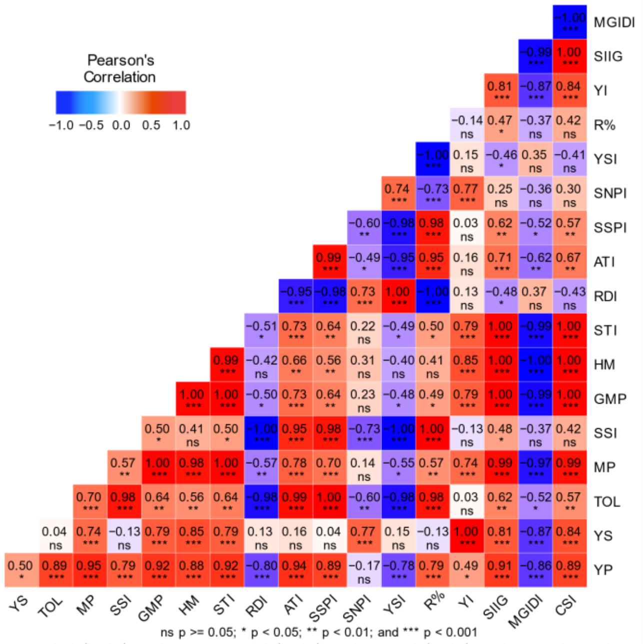
در این تحقیق از شاخص SIIG به‌منظور انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی، با استفاده از شاخص‌های Yp، Ys، MP، GMP، HM، STI و YI به‌طور هم‌زمان، استفاده شد. شاخص SIIG، بر مبنای هفت شاخص مورد بررسی و فرضیات شبیه به شاخص MGIDI محاسبه شد (جدول ۳). با توجه به اینکه میزان تغییرات شاخص SIIG بین صفر و یک است، هر چه مقدار آن برای یک ژنوتیپ به یک نزدیک‌تر باشد، آن ژنوتیپ از تحمل به خشکی بالاتری برخوردار است (Zali *et al.*, 2015). براساس شاخص SIIG، لاین‌های ۱۸، ۲، ۱۷، ۱ و ۱۰ به‌ترتیب با بیشترین مقدار SIIG، جزء ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی شناخته شدند. نتایج همبستگی بین شاخص SIIG و Yp و Ys نشان داد که شاخص SIIG همبستگی معنی‌داری با Yp ($r=0/91^{**}$) و Ys ($r=0/81^{**}$) داشت (شکل ۴). در تحقیقات متعددی، کارایی شاخص SIIG، براساس ادغام شاخص‌های تحمل به تنش‌های غیرزیستی گزارش شده است (Yagoutipour *et al.*, 2017; Ramzi *et al.*, 2018; Abdollahi Hesar *et al.*, 2021; Taleghani and Saremirad, 2022). یاقوتی‌پور و همکاران (Yagoutipour *et al.*, 2017) گزارش دادند که شاخص SIIG یک روش ترکیبی کارآمد در انتخاب موثرتر ژنوتیپ‌های مطلوب گندم نان است. طهماسبی و همکاران (Tahmasebi *et al.*, 3018) گزارش دادند که شاخص SIIG روش مناسبی برای ادغام شاخص‌های تحمل به خشکی برای افزایش کارایی انتخاب ژنوتیپ‌های گندم نان است.

برای محاسبه شاخص CSI (Sabouri *et al.*, 2022) از شاخص‌های MP، GMP، HM، STI و YI، که همبستگی معنی‌داری با Yp و Ys داشتند، استفاده شد. نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های ۱۸، ۲، ۱۷، ۱۰ و ۱ به‌ترتیب با بیشترین مقدار CSI بیشترین تحمل را به تنش خشکی داشتند. شاخص CSI همبستگی معنی‌داری با Ys ($r=0/84^{*}$) و Yp ($r=0/89^{*}$) داشت (شکل ۴). در یک آزمایش که به‌منظور شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی جو از شاخص CSI استفاده شده بود، برای محاسبه CSI از شاخص‌های MP، GMP، HM و STI که همبستگی معنی‌داری با Yp و Ys داشتند، استفاده شد (Bardehji *et al.*, 2023). کارایی شاخص CSI در شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به شوری در خردل نیز گزارش شده است (Kumawat *et al.*, 2024).

به‌منظور ارزیابی ارتباط بین شاخص‌های تحمل به خشکی و گروه‌بندی آن‌ها از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. براساس نتایج، اولین و دومین

مولفه به‌ترتیب ۷۰/۴ و ۲۹/۴ درصد از تغییرات ارتباط بین شاخص‌های تحمل به خشکی را توجیه کردند (شکل A۵). در مولفه اول علاوه بر Yp، شاخص‌های MP، ATI، STI، GMP، SIIG، TOL، SSPI، CSI و HM به‌ترتیب بیشترین سهم را داشتند (شکل ۵B). شاخص‌های SNPI، Ys، YSI، R%، SSI، RDI، MGIDI، HM، CSI و SSPI به‌ترتیب دارای بیشترین سهم در دومین مولفه بودند (شکل C۵).

براساس نتایج تجزیه بای‌پلات (شکل A۵) که بر مبنای دو مولفه اول و دوم رسم شده و ۹۹/۸ درصد از تغییرات ارتباط بین شاخص‌های تحمل به خشکی را توجیه کردند، شاخص‌های تحمل به خشکی در چهار ناحیه بای پلات قرار گرفتند. در ناحیه اول که شاخص MGIDI واقع شده بود، لاین‌های ۷، ۹، ۱۲ و ۱۵ قرار داشتند. این لاین‌ها در هر دو محیط تنش و بدون تنش، پتانسیل عملکرد پایین داشتند. با توجه به این‌که ژنوتیپ‌هایی که کمترین مقدار MGIDI را داشته باشند، برتر هستند، این شاخص در ناحیه یک قرار گرفت. در ناحیه دو شاخص‌های ATI، TOL، SSPI، SSI و R قرار داشتند. با توجه به این‌که مقدار پایین این شاخص‌ها، معرف ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی است، ژنوتیپ‌های این ناحیه (ژنوتیپ‌های ۱، ۲، ۵، ۱۴ و ۱۹) حساس به خشکی محسوب شدند. این ژنوتیپ‌ها در شرایط بدون تنش پتانسیل عملکرد بالایی داشتند. شاخص‌های MP، GM، HM، STI، Yp و Ys و شاخص‌های SIIG و CSI در ناحیه سه قرار گرفتند. شاخص‌های ناحیه سه، بیشترین همبستگی را با عملکرد دانه در شرایط تنش و بدون تنش داشتند. لاین‌های ۶، ۱۰، ۱۳، ۱۷ و ۱۸ که در این ناحیه قرار داشتند دارای عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل هم در شرایط تنش و

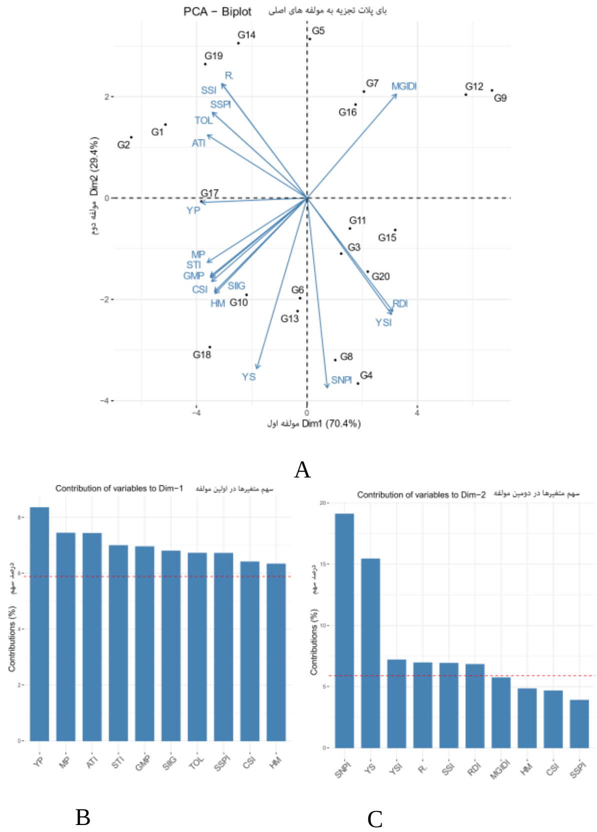


ns p >= 0.05; * p < 0.05; ** p < 0.01; and *** p < 0.001

ns: غیر معنی دار، *: معنی دار در سطح احتمال ۵، **: معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد و ***: معنی دار در سطح احتمال ۱ هزارم درصد

شکل ۴- همبستگی بین عملکرد دانه در شرایط بدون تنش و تنش خشکی انتهای فصل با شاخص‌های انتخاب در ژنوتیپ‌های گندم دوروم

Fig. 4. Correlation of grain yield under normal and terminal drought stress conditions and selection indices in durum wheat genotypes



شکل ۵- بای‌پلات تجزیه به مولفه‌های اصلی برای شاخص‌های تحمل و حساسیت به تنش خشکی در ژنوتیپ‌های گندم دوروم (A). سهم شاخص‌های ارزیابی در اولین مولفه (B) و دومین مولفه PCA (C)

Fig. 5. Biplot of principal components analysis for drought tolerance and susceptibility indices in durum wheat genotypes (A). Contribution of indices in the first component and (B) the second component (C) of PCA

هم در شرایط بدون تنش بودند. بر این اساس شاخص‌های این گروه برای شناسایی ژنوتیپ‌های پرمحصول و متحمل به تنش خشکی، بهتر از سایر شاخص‌ها بودند. ژنوتیپ ۱۸با رتبه اول عملکرد دانه در شرایط تنش و رتبه پنجم عملکرد دانه در شرایط بدون تنش، یکی از بهترین ژنوتیپ‌های این ناحیه بود. در ناحیه چهار شاخص‌های SNPI، RDI و YSI قرار گرفتند. شاخص‌های ناحیه چهار با شاخص‌های ناحیه یک همبستگی بالا و منفی داشتند. ژنوتیپ‌های واقع در این ناحیه دارای رتبه عملکرد دانه بهتری در شرایط تنش بودند. ژنوتیپ‌های این ناحیه شامل ۳، ۴، ۸، ۱۱، ۱۵ و ۲۰ بودند که لاین‌های ۴ و ۸ جزء ژنوتیپ‌های متحمل شناخته شدند (شکل A5). در ارزیابی ژنوتیپ‌های گندم دوروم برای تحمل به تنش خشکی و ارتباط بین شاخص‌ها، از روش PCA استفاده شد و گزارش شد که شاخص‌های MP، GMP، STI، YI و HM بیشترین همبستگی را با عملکرد در شرایط تنش و بدون تنش داشتند (Sangi *et al.*, 2022). نتایج مشابهی نیز در این مورد گزارش شده است (Bihamta *et al.*, 2018).

هدف از استفاده از شاخص‌های ترکیبی مانند SIIG، CSI و MGIDI، انتخاب بهتر ژنوتیپ‌های برتر است. در واقع با این شاخص‌ها، رتبه‌بندی و شناسایی ژنوتیپ‌های برتر با سهولت انجام شده و کارایی انتخاب افزایش می‌یابد (Barati *et al.*, 2021). در تحقیق حاضر نیز به‌منظور افزایش کارایی انتخاب از شاخص‌های تحمل

به خشکی که همبستگی معنی‌داری با Yp و Ys داشتند، استفاده شد. تنها تفاوت دو شاخص SIIG و MGIDI با شاخص CSI این است که برای محاسبه آنها علاوه بر شاخص‌های معنی‌دار، از Yp و Ys هم استفاده می‌شود، اما نتایج هر سه شاخص مشابه بود و ژنوتیپ‌های ۲، ۱۰، ۱۷ و ۱۸ انتخاب شدند. براساس نتایج هر سه شاخص، تنها ژنوتیپ‌های ۱۸ و ۲ به‌ترتیب در رتبه‌های اول و دوم قرار گرفتند. با توجه به این‌که ژنوتیپ ۲ شاهد (رقم هانا) است، بنابراین ژنوتیپ ۱۸ براساس نتایج هر سه شاخص به‌عنوان برترین ژنوتیپ شناخته شد.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج آزمایش حاضر ژنوتیپ‌های انتخابی برتر در هر سه شاخص SIIG، MGIDI و CSI مشابه بود و در همه آنها ژنوتیپ‌های ۱۸ و ۲ به‌ترتیب حائز رتبه اول و دوم بودند. همبستگی هر سه شاخص با Yp و Ys در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، با این تفاوت که همبستگی شاخص MGIDI با Yp و Ys منفی بود و دلیل این موضوع این است که در شاخص MGIDI، ژنوتیپ‌هایی با مقدار پایین این شاخص انتخاب می‌شوند. نتایج نشان‌دهنده کارایی شاخص‌های ترکیبی در انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی با عملکرد دانه بالا در هر دو شرایط تنش و بدون تنش بود. نتایج نشان داد که ژنوتیپ‌های ناحیه یک نمودار تجزیه به مولفه‌های اصلی، شامل ژنوتیپ‌های کم پتانسیل در هر دو شرایط تنش و بدون تنش بودند. ژنوتیپ‌های ناحیه دو شامل ژنوتیپ‌های دارای عملکرد دانه بالا در شرایط بدون تنش بودند. ژنوتیپ‌های ناحیه سه، شامل ژنوتیپ‌های دارای پتانسیل عملکرد دانه بالا در هر دو شرایط تنش و بدون تنش بودند. به‌همین دلیل انتخاب ژنوتیپ‌های برتر در این ناحیه انجام شد. بر این اساس، شاخص‌های MP، GM، HM و STI که در ناحیه سه نمودار تجزیه به مولفه‌های اصلی قرار داشتند، بهتر از سایر شاخص‌ها ژنوتیپ‌های پرمحصول و متحمل به تنش خشکی را شناسایی کردند. لاین‌های ۱۰، ۱۷ و ۱۸ که در این ناحیه سه قرار داشتند، دارای عملکرد دانه بالاتر از میانگین کل هم در شرایط تنش و هم در شرایط بدون تنش بودند، ولی در مجموع لاین ۱۸ به‌عنوان ژنوتیپ برتر متحمل به تنش خشکی انتهای فصل برای توسعه کشت در منطقه داراب و سایر مناطق با شرایط مشابه، پس از بررسی‌های تکمیلی، شناخته شد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر مستخرج از پروژه شماره ۹۹۱۱۰۹-۰-۰۳-۱۳۰ مصوب موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر می‌باشد. بدینوسیله از همکاری صمیمانه موسسه در حمایت مالی و همچنین همکاران ایستگاه تحقیقات کشاورزی داراب که در اجرای این پروژه مساعدت نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

References

Abdollahi Hesar, A., Sofalian, O., Alizadeh, B., Zali, H. and Asghari, A. 2021. Investigation of frost stress tolerance in some promising rapeseed genotypes. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 31, pp.271-288. [In Persian]. https://doi.10.22034/saps.2021.13109

Bihamta, M., Shirkavand, M., Hasanpour, J. and Afzalifar, A. 2018. Evaluation of durum wheat genotypes under normal irrigation and drought stress conditions. *Journal of Crop Breeding*, 9, pp.119-136. [In Persian]. https://doi:10.29252/jcb.9.24.119

Bardehji, S., Soltan, S., Eshghizadeh, H.R., Zahedi, M., Zare, S., Koçak, M.Z., Nouraein, M., Vita, F. and

Vergine, M. 2023. Responses of two-row and six-row barley genotypes to elevated carbon dioxide concentration and water stress. *Agronomy*, 13(9), 2373. https://doi.org/10.3390/agronomy13092373

Barati, A., Zali, H., Marzoqian, A., Koohkan, Sh. and Gholipour, A. 2021. Selection of barley pure lines with high yield and desirable agronomic characteristics in warm areas of Iran. *Crop Production*. 14(1), 199-218. [In Persian]. https://10.22069/ejcp.2021.18845.2403

Ermişer, D. and Yalçın, E. 2021. Dietary fiber, protein profile and technological characteristics of durum spaghetti enriched with refined/whole grain hull-less barley flour. *Journal Cereal Science*, 102, 103315. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103315

Choukan, R., Taherkhani, T., Ghannadha, M.R. and Khodarahmi, M. 2006. Evaluation of drought tolerance in grain maize inbred lines using drought tolerance indices. *Iranian Journal Agricultural Sciences*, 8, pp.79-89. [In Persian]. http://agrobreedjournal.ir/article-1-306-en.html

Farshadfar, E. and Elyasi, P. 2012. Screening quantitative indicators of drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) landraces. *European Journal of Experimental Biology*, 2, pp.577-584.

Fernandez, G.C.J. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. *In:* Kuo, C.G., Ed. Adaptation of food crops to temperature and water stress. Shanhua: Asian Vegetable Research and Development Center, Taiwan, Publ. No. 93-410, 257-270.

Fischer, R. A. and Maurer, R. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. Part 1: grain yield response. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29, pp.897- 912. http://dx.doi.org/10.1071/AR9780897

Fischer, R.A. and Wood, T. 1979. Drought resistance in spring wheat cultivars III. Yield association with morphological traits. *Australian Journal of Agricultural Research*, 30, pp.1001-1020. http://doi:10.1071/AR9791001

Gavuzzi, P., Rizza, F., Palumbo, M., Campaline, R.G., Ricciardi, G.L. and Borghi, B. 1997. Evaluation of field and laboratory of drought and heat stress in winter cereals. *Canadian Journal Plant Science*, 77, pp.523-531. https://doi.org/10.4141/P96-130

Gonzalez-Segura, E., Magaña-Barajas, E., Torres-Chávez, P.I., Manthey, F. and Ramírez-Wong, B. 2014. Characterization of the dynamic viscoelastic behavior of semolina dough obtained from Mexican durum wheat cultivars. *Advanced Chemical Engineering Research*, 3, pp.58–63.

International Grains Council. 2021. IGC, International Grains Council. Accessed on 15 January 2023. Available online: https://www.igc.int/en/default.aspx.

Kumawat, G., Jakhar, M.L., Singh, V., Singh, J., Kumar Gothwal, D. and Kumar Yadava, D. 2024. High throughput phenotyping of functional traits and key indices for selection of salt tolerant mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern & Coss] genotypes. *Physiologia Plantarum*, 176(1), e14178. https://doi.org/10.1111/ppl.14178

Martínez-Moreno, F., Solís, I., Noguero, D., Blanco, A., Özberk, İ., Nsarellah, N., Elias, E., Mylonas, I.

and Soriano, J.M. 2020. Durum wheat in the Mediterranean Rim: Historical evolution and genetic resources. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 67, pp.1415–1436. https://doi.org/10.1007/s10722-020-00913-8

Mohammadnia, S., Asghari, A., Sofalian, O., Mohammaddoust, H. and Karimizadeh R. 2017. Evaluation of durum wheat lines using seed yield based indices in drought condition and relation between these indices. *Journal of Crop Breeding*, 8, pp.11-23. [In Persian]. http://jcb.sanru.ac.ir/article-1-373-fa.html

Moosavi, S.S., Yazdi Samadi, B., Naghavi, M.R., Zali, A.A., Dashti, H. and Pourshahbazi, A. 2008. Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. *Desert*, 12, pp.165-178. https://doi.10.22059/jdesert.2008.27115

Olivoto, T. and Nardino, M. 2020. MGIDI: A novel multi-trait index for genotype selection in plant breeding. *Bioinformatics*, pp.1–22. https://doi.org/10.1101/2020.07.23.217778

Olivoto, T. and Nardino, M. 2021. MGIDI: Toward an effective multivariate selection in biological experiments. *Bioinformatics*, 37, pp.1383–1389. https://doi.org/10.1101/2020.07.23.217778

Ramzi, E., Asghari, A., Khomari, S. and Chamanabad, H.M. 2018. Investigation of durum wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. *Durum Desf*) lines for tolerance to aluminum stress condition. *Journal of Crop Breeding*, 10(25), pp.63-72. [In Persian]. https://doi.10.29252/jcb.10.25.63

Rosielle, A.A. and Hamblin, J. 1981. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. *Crop Science,* 21, pp.943-946. https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x

Sabouri, A., Dadras, A.R., Azari, M., Saberi Kouchesfahani, A., Taslimi, M. and Jalalifar, R. 2022. Screening of rice drought tolerant lines by introducing a new composite selection index and competitive with multivariate methods. *Scientific Reports*, 12, pp.2163, https://doi.org/10.1038/s41598-022-06123-9

Sangi , S.E., Najaphy, A., Cheghamirza, K. and Mohammadi, R. 2022. Assessment of drought tolerance indices in durum wheat (*Triticum durum* L.) genotypes. *Environmental Stress In Crop Sciences*. 14, pp.901-911. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2020.3310.1842

Sio-Se Mardeh, A., Ahmadi, A., Poustini, K. and Mohammadi, V. 2006. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditioning. *Field Crops Research*, 98, pp.222-229. https://doi.10.1016/j.fcr.2006.02.001

Tahmasebi, S., Dastfal, M., Zali, H. and Rajaei, M. 2018. Drought tolerance evaluation of bread heat cultivars and promising lines in warm and dry climate of the south. *Cereal Research*, 8(2), pp.209-225. [In Persian]. https://doi.10.22124/c.2018.10434.1398

Taleghani, D. and Saremirad, A. 2022. Drought impacts on the reaction of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) pollinator lines in terms of sugar. *Crop Science Research in Arid Regions.* 4, pp.371-388. [In Persian]. https://doi.10.22034/CSRAR.2022.321003.1173

Yagoutipour, A., Farshadfar, E. and Saeedi, M. 2017. Assessment of durum wheat genotypes for drought

tolerance by suitable compound method. *Environmental Stress in Crop Sciences*, 10(2), pp.247-256. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2017.581

Zali, H., Sofalian, O., Hasanloo, T., Asghari, A. and Hoseini, S. M. 2015. Appraising of drought tolerance relying on stability analysis indices in canola genotypes simultaneously, using selection index of ideal genotype (SIIG) technique: Introduction of new method. *Biological Forum – An International Journal*, 7, pp.703-711.

Zali, H., Sofalian, O., Hasanloo, T., Asghari, A. and Zeinalabedini, M. 2017. Appropriate strategies for selection of drought tolerant genotypes in canola. *Journal of Crop Breeding*, 78, pp.77-90. [In Persian]. https://doi.10.29252/jcb.11.29.117

Zali, H., Barati, A., Pour-Aboughadareh, A.R., Gholipour, A., Koohkan, S., Marzoghiyan, A., Bocianowski, J., Bujak, H. and Nowosad, K. 2023. Identification of superior barley genotypes using selection index of ideal genotype (SIIG). *Plants*, 12, pp.1843. https://doi.org/10.3390/plants12091843

Zivcak, M., Brestic, M., Balatova, Z., Drevenakova, P., Olsovska, K., Kalaji, H.M., Yang, X. and Allakhverdiev, S.I. 2013. Photosynthetic electron transport and specific photoprotective responses in wheat leaves under drought stress. *Photosynthesis Research*, 117, pp.529-546 https://doi.org/10.1007/s11120-013-9885-3